

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4474556号  
(P4474556)

(45) 発行日 平成22年6月9日(2010.6.9)

(24) 登録日 平成22年3月19日(2010.3.19)

(51) Int.Cl.

F 1

GO 1 Q 60/32 (2010.01)

GO 1 N 13/16 I O 1 D

請求項の数 8 (全 13 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2007-551000 (P2007-551000)</p> <p>(86) (22) 出願日 平成18年10月12日(2006.10.12)</p> <p>(86) 国際出願番号 PCT/JP2006/320415</p> <p>(87) 国際公開番号 W02007/072621</p> <p>(87) 国際公開日 平成19年6月28日(2007.6.28)</p> <p>審査請求日 平成21年7月2日(2009.7.2)</p> <p>(31) 優先権主張番号 特願2005-364797 (P2005-364797)</p> <p>(32) 優先日 平成17年12月19日(2005.12.19)</p> <p>(33) 優先権主張国 日本国(JP)</p> <p>特許法第30条第1項適用 平成17年11月23日~25日 日本生物物理学会主催の「第43回年会講演」において文書をもって発表</p> <p>早期審査対象出願</p>	<p>(73) 特許権者 504160781 国立大学法人金沢大学 石川県金沢市角間町ヌ7番地</p> <p>(74) 代理人 230104019 弁護士 大野 聖二</p> <p>(74) 代理人 100106840 弁理士 森田 耕司</p> <p>(74) 代理人 100105991 弁理士 田中 玲子</p> <p>(72) 発明者 安藤 敏夫 石川県金沢市角間町ヌ7番地 国立大学法人金沢大学内</p> <p>(72) 発明者 坂下 満 石川県金沢市角間町ヌ7番地 国立大学法人金沢大学内</p> <p style="text-align: right;">最終頁に続く</p>
---	---

(54) 【発明の名称】 走査型プローブ顕微鏡

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

カンチレバーを振動させて、前記カンチレバーと試料を相対的に走査する走査型プローブ顕微鏡であって、

前記カンチレバーを励振する励振部と、

前記カンチレバーにおける励振周波数の整数倍の周波数成分の振幅である整数倍成分振幅を検出する整数倍振幅検出部と、

検出された前記整数倍成分振幅に基づいて前記励振部の励振強度を調節する励振強度調節部と、

を備えたことを特徴とする走査型プローブ顕微鏡。

10

【請求項2】

前記整数倍振幅検出部は、前記励振周波数の2倍の周波数を持つ2倍波成分の振幅である2倍波成分振幅を検出する2倍波振幅検出部であることを特徴とする請求項1に記載の走査型プローブ顕微鏡。

【請求項3】

前記励振強度調節部は、前記整数倍成分振幅が一定になるように前記励振強度を制御することを特徴とする請求項1に記載の走査型プローブ顕微鏡。

【請求項4】

前記励振強度調節部は、前記カンチレバーの走査によって1枚以上の画像が得られる時間に対応する速さで前記励振強度を調節する低速制御部を含むことを特徴とする請求項1

20

に記載の走査型プローブ顕微鏡。

【請求項 5】

前記励振強度調節部は、前記 1 枚以上の画像が得られる時間に対応する時定数を持つ積分回路を含むことを特徴とする請求項 4 に記載の走査型プローブ顕微鏡。

【請求項 6】

カンチレバーを振動させて、前記カンチレバーと試料を相対的に走査する走査型プローブ顕微鏡であって、

カンチレバーと、

前記カンチレバーを振動させる発振回路と、

前記カンチレバーにおける励振周波数の整数倍の周波数成分の振幅である整数倍成分振幅を検出する整数倍振幅検出回路と、

検出された前記整数倍成分振幅に基づいて前記カンチレバーの励振源の励振強度を調節する励振強度調節回路と、

を備えたことを特徴とする走査型プローブ顕微鏡。

【請求項 7】

カンチレバーを振動させて、前記カンチレバーと試料を相対的に走査する走査型プローブ顕微鏡にて用いられ、前記カンチレバーを励振するカンチレバー励振装置であって、

前記カンチレバーにおける励振周波数の整数倍の周波数成分の振幅である整数倍成分振幅を検出する整数倍振幅検出部と、

検出された前記整数倍成分振幅に基づいて前記カンチレバーの励振源の励振強度を調節する励振強度調節部と、

を備えたことを特徴とするカンチレバー励振装置。

【請求項 8】

カンチレバーを振動させて、前記カンチレバーと試料を相対的に走査する走査型プローブ顕微鏡にて用いられ、前記カンチレバーを励振するカンチレバー励振方法であって、

前記カンチレバーを設定された励振周波数で励振し、

前記カンチレバーにおける励振周波数の整数倍の周波数成分の振幅である整数倍成分振幅を検出し、

検出された前記整数倍成分振幅に基づいて前記カンチレバーの励振源の励振強度を調節する、

ことを特徴とするカンチレバー励振方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、走査型プローブ顕微鏡に関し、特に、カンチレバーを励振する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、典型的な走査型プローブ顕微鏡 (SPM) としては、走査型トンネル顕微鏡 (STM) および原子間力顕微鏡 (AFM) が知られている。これらのうち、AFM は、探針を自由端に持つカンチレバーと、カンチレバーの変位を検出する変位センサと、試料ステージスキャナとを備える。AFM は、 piezo 素子 (圧電素子) を振動させることによってカンチレバーを共振周波数付近の周波数で振動させ、振動するカンチレバーの探針を試料に接触させる。試料への接触により、カンチレバーの振動振幅が減少する。変位センサの出力に基づき、振幅減少量を保ったままカンチレバーと試料が相対的に走査される。

【0003】

振幅減少量を一定に保つために、振幅目標値 (セットポイント) が設定される。振幅目標値は、自由振動振幅より少し小さく設定される。例えば、振幅目標値は、自由振動振幅の 0.9 倍に設定される。試料ステージの X Y 方向の走査中に変位センサにより振幅値が検出され、振幅値が振幅目標値に一致するように試料ステージが上下方向 (Z 方向) にフ

10

20

30

40

50

ィードバック制御される。

【 0 0 0 4 】

振幅値が振幅目標値よりも小さくなった場合には、A F Mは、探針が試料に近づき過ぎていると判断し、試料ステージをカンチレバーから遠ざける。他方、振幅値が目標値よりも大きくなった場合には、A F Mは、探針が試料から離れ過ぎていると判断して試料ステージをカンチレバーに近づける。このようなフィードバック走査によって試料と探針の距離が一定に維持され、フィードバック信号などから試料の表面形状などの情報が得られる。

【 0 0 0 5 】

このようなフィードバック走査は、カンチレバーの励振効率が一定であることを前提としている。励振効率は、概念的には、励振源の励振強度（振幅  $A_0$ ）に対するカンチレバーの実際の振動強度（振幅  $A$ ）の大きさであり、振幅比（ $k A / A_0$ 、 $k$ は定数）で表すことができる。励振源は例えば上記の圧電素子である。カンチレバーの実際の振幅は、カンチレバーおよびその他の関連要素の影響を受ける。例えば、液体中での使用では、周囲の液体がカンチレバーの振幅に影響する。このような種々の要因でカンチレバーの振幅が決まり、励振効率も決まる。

10

【 0 0 0 6 】

しかしながら、実際のA F Mでは励振効率が走査中に変化してしまうことが知られている。例えば、励振効率が下がったとすると、カンチレバーの振幅が減少する。この場合、A F Mは、探針が試料に近づき過ぎていると判断して、試料ステージをカンチレバーから遠ざけてしまう。励振効率が下がるほどカンチレバー探針は試料表面からますます遠ざかり、やがて探針は試料表面から完全に離れてしまい、その結果、A F Mはイメージングを行えなくなる。

20

【 0 0 0 7 】

このような励振効率のドリフトは、種々のドリフトの中で最も大きな問題になる。このドリフトが原因になり、長時間（数分）のイメージングが難しくなる。この問題は、高速な原子間力顕微鏡でも通常の原子間力顕微鏡でも存在する。

【 0 0 0 8 】

従来、励振効率を検出しようとした場合、探針が試料表面から完全に離れている状態で振動振幅を計測し、自由振動振幅を求める必要がある。この計測は、実際のイメージング走査中にはできない。したがって、従来の検出方法を利用しても、走査中の励振効率ドリフトの補正はできない。

30

【 0 0 0 9 】

励振効率のドリフトが生じると、振幅とその目標値の関係が変化し、その結果として上記のようにイメージングに悪影響が及ぶ。このような問題に対処するため、Schienerらは、カンチレバーの2倍波共振（1次共振周波数の2倍の周波数成分）の振幅信号が探針 - 試料間の接触の強さに対して敏感であることを利用して、振幅目標値に対してP I制御を行っている（Schiener et al., "Stabilized atomic force microscopy imaging in liquids using second harmonic of cantilever motion for setpoint control", Review Of Scientific Instrument, American Institute of Physics, August 2004, Volume 75, Number 8, pp.2564-2568.）。しかし、この方法は、目標値を変える結果として探針 - 試料間に働く力を走査中に変化させてしまう点で不利である。

40

【 0 0 1 0 】

また、A F Mには、接触A F M（Contact AFM）の他に非接触A F M（Non-contact AFM）が知られている。非接触A F Mは、探針が試料に近接した状態で使用される。上述した励振効率の問題は、接触A F Mに限られない。同様の問題が非接触A F Mにも生じ得る。

【 発明の開示 】

【 発明が解決しようとする課題 】

50

## 【 0 0 1 1 】

本発明は、上記背景の下でなされてものであり、その目的は、走査中に励振効率が変化しても、長時間安定に使用可能な走査型プローブ顕微鏡を提供することにある。

## 【課題を解決するための手段】

## 【 0 0 1 2 】

本発明の一の態様は、カンチレバーを振動させて、カンチレバーと試料を相対的に走査する走査型プローブ顕微鏡であって、カンチレバーを励振する励振部と、カンチレバーにおける励振周波数の整数倍の周波数成分の振幅である整数倍成分振幅を検出する整数倍振幅検出部と、検出された整数倍成分振幅に基づいて励振部の励振強度を調節する励振強度調節部と、を備えている。

10

## 【 0 0 1 3 】

本発明の別の態様に係る走査型プローブ顕微鏡は、カンチレバーを振動させて、カンチレバーと試料を相対的に走査する。この走査型プローブ顕微鏡は、カンチレバーと、カンチレバーを振動させる発振回路と、カンチレバーにおける励振周波数の整数倍の周波数成分の振幅である整数倍成分振幅を検出する整数倍振幅検出回路と、検出された整数倍成分振幅に基づいてカンチレバーの励振源の励振強度を調節する励振強度調節回路と、を備える。

## 【 0 0 1 4 】

本発明の別の態様は、カンチレバーを振動させて、カンチレバーと試料を相対的に走査する走査型プローブ顕微鏡にて用いられ、カンチレバーを励振するカンチレバー励振装置であって、カンチレバーにおける励振周波数の整数倍の周波数成分の振幅である整数倍成分振幅を検出する整数倍振幅検出部と、検出された整数倍成分振幅に基づいてカンチレバーの励振源の励振強度を調節する励振強度調節部と、を備えている。

20

## 【 0 0 1 5 】

本発明の別の態様は、カンチレバーを振動させて、カンチレバーと試料を相対的に走査する走査型プローブ顕微鏡にて用いられ、カンチレバーを励振するカンチレバー励振方法であって、カンチレバーを設定された励振周波数で励振し、カンチレバーにおける励振周波数の整数倍の周波数成分の振幅である整数倍成分振幅を検出し、検出された整数倍成分振幅に基づいてカンチレバーの励振源の励振強度を調節する。

## 【 0 0 1 6 】

上述のように、本発明によれば、カンチレバーの振動の整数倍成分振幅が検出されて、整数倍成分振幅に基づいて励振強度が調節される。整数倍成分振幅は、探針 - 試料間の接触の強さに敏感である。励振強度は、励振源の強度（振幅）であり、励振源は例えば圧電素子である。本発明により、励振効率が変化しても、励振源サイドの励振強度が調節制御されて整数倍成分振幅が維持される。これにより、カンチレバーサイドでは探針部分の実際の接触強さと振幅（より詳細には、試料の凹凸に依存しない長時間平均としての接触強さと振幅（共振））が保たれる。したがって、長時間安定に顕微鏡を使用することが可能になる。

30

## 【 0 0 1 7 】

このように、本発明は、上記の整数倍成分振幅に基づいて励振強度を調節することにより、励振効率が変化しても、長時間安定に顕微鏡を使用することを可能にする。

40

## 【 0 0 1 8 】

本発明は、接触 A F M (Contact AFM) にも非接触 A F M (Non-contact AFM) にも適用されてよい。具体的には、接触 A F M ではカンチレバーが試料に接触し、接触しているカンチレバーの整数倍波成分振幅が検出される。一方、非接触 A F M ではカンチレバーが試料に近接し、近接しているカンチレバーの整数倍波成分振幅が検出される。非接触 A F M は、探針と試料が接触しなくても探針と試料との間に微弱ながらも存在する相互作用力を利用する。この相互作用力と整数倍波成分の関係が、接触 A F M における接触強さと整数倍波成分の関係と同様に利用されてよい。これにより、本発明が非接触 A F M に適用されてよい。この点は、以下の説明において同様に当てはまる。

50

## 【 0 0 1 9 】

以下に説明するように、本発明には他の態様が存在する。したがって、この発明の開示は、本発明の一部の態様の提供を意図しており、ここで記述され請求される発明の範囲を制限することは意図していない。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 2 0 】

【 図 1 】 図 1 は、本発明の実施の形態における原子間顕微鏡のブロック図である。

【 図 2 】 図 2 は、カンチレバー振動のパワースペクトルを示す図である。

【 図 3 】 図 3 は、原子間顕微鏡における励振機能の構成を示す図である。

【 図 4 】 図 4 は、本実施の形態による励振強度調節の効果を示す図である。

10

## 【 発明を実施するための最良の形態 】

## 【 0 0 2 1 】

以下に本発明の詳細な説明を述べる。ただし、以下の詳細な説明と添付の図面は発明を限定するものではない。代わりに、発明の範囲は添付の請求の範囲により規定される。

## 【 0 0 2 2 】

本実施の形態では、本発明が原子力間顕微鏡 ( A F M ) に適用される。

図 1 は、本実施の形態の A F M の構成を示している。 A F M 1 は、全体構成としては、試料ステージ 3 と、カンチレバー 5 と、試料ステージ 3 を X Y Z 方向に走査する構成と、カンチレバー 5 を共振周波数付近の周波数で振動させる構成と、カンチレバー 5 の変位を検出する構成と、カンチレバー 5 の振幅を一定に保つフィードバック走査のための構成と、装置全体を制御するコンピュータ 7 とを備えている。

20

## 【 0 0 2 3 】

試料ステージ 3 は、下面に試料を保持するように構成されている。試料ステージ 3 はスキャナ 1 1 に取り付けられており、スキャナ 1 1 はアクチュエータ 1 3 を備えている。アクチュエータ 1 3 は、 piezo 素子 ( 圧電素子 ) で構成されており、試料ステージ 3 を X、Y、Z 方向に動かして、試料をカンチレバー 5 に対して相対的に走査する。図 1 では、X Y 方向は、水平面上で直交する方向であり、Z 方向は鉛直方向である。Z 方向は試料の凹凸方向 ( 高さ方向 ) である。アクチュエータ 1 3 は、アクチュエータ駆動回路 1 5 によって駆動され、アクチュエータ駆動回路 1 5 は走査制御回路 1 7 によって制御される。

## 【 0 0 2 4 】

カンチレバー 5 は、窒化シリコン製であり、自由端に探針を有している。カンチレバー 5 はホルダ 2 1 によって保持されている。ホルダ 2 1 は励振用 piezo 素子 2 3 ( 励振用圧電素子 ) と共に設けられており、励振用 piezo 素子 2 3 は、piezo 素子駆動回路 2 5 によって駆動される。発振器 2 7 は正弦波発振器である。発振器 2 7 から供給される励振信号に従って、piezo 素子駆動回路 2 5 が励振用 piezo 素子 2 3 を振動させ、カンチレバー 5 を振動させる。発振器 2 7 はコンピュータ 7 により制御されており、発振器 2 7 へはコンピュータ 7 から励振強度 ( 振幅 ) を表す指令信号が供給される。

30

## 【 0 0 2 5 】

また、本実施の形態の特徴として、カンチレバー 5 の励振効率のドリフトの影響を防ぐために、2 倍波振幅検出回路 3 1 および励振強度調節回路 3 3 が備えられている。これら構成については後に詳細に説明する。

40

## 【 0 0 2 6 】

センサ 4 1 は、レーザユニット 4 3 と共に、光てこ式の変位センサを構成している。レーザユニット 4 3 は、レーザ光をカンチレバー 5 に照射する。レーザ光はカンチレバー 5 で反射してセンサ 4 1 に届く。センサ 4 1 は、フォトダイオードで構成されており、カンチレバー 5 の変位を表す信号を出力する。図では、センサに関連したレンズ等の光学系の構成は省略されている。

## 【 0 0 2 7 】

A F M 1 は、フィードバック走査のために、振幅検出回路 4 5 およびフィードバック回路 4 7 を備えている。振幅検出回路 4 5 は、センサ 4 1 から入力される変位信号を処理し

50

てカンチレバー 5 の振幅を求める。ここでは、励振周波数成分（1 次成分）の振幅が求められる。

【0028】

検出された振幅値は、フィードバック回路 47 へ出力される。また、フィードバック回路 47 には、コンピュータ 7 から振幅目標値が入力される。フィードバック回路 47 は、検出された振幅値から振幅目標値を減算して偏差信号を生成する減算器と、偏差信号を増幅する PID 回路とを備えており、これら構成によってフィードバック信号が生成される。フィードバック走査の振幅目標値は、コンピュータ 7 から供給される。この振幅目標値は、適当な回路構成などを用いて手動で設定されてもよい。

【0029】

フィードバック信号は走査制御回路 17 に供給されて、フィードバック走査に利用される。また、フィードバック信号はコンピュータ 7 に供給されて、試料画像の生成処理に使用される。

【0030】

コンピュータ 7 は、AFM1 の全体を制御している。コンピュータ 7 はユーザインターフェース機能も提供する。ユーザの各種の指示がコンピュータ 7 に入力され、コンピュータ 7 はユーザの入力に従って AFM1 を制御する。また、コンピュータ 7 は試料表面の画像を生成してモニタ 51 に出力する。

【0031】

次に、AFM1 の全体的な動作を説明する。走査制御回路 17 にコンピュータ 7 から X Y 方向の走査の制御信号が供給される。走査制御回路 17 は制御信号に従ってアクチュエータ駆動回路 15 を制御して、アクチュエータ 13 に X Y 方向の走査を行わせる。また、コンピュータ 7 は発振器 27 へ励振強度（振幅）の指令値を供給する。発振器 27 は、コンピュータ 7 の制御下で励振信号を生成して、励振信号を piezo 素子駆動回路 25 へ供給する。piezo 素子駆動回路 25 が励振用 piezo 素子 23 を駆動し、カンチレバー 5 が共振周波数近傍の周波数で振動する。このようにして、カンチレバー 5 が振動した状態で、カンチレバー 5 と試料が相対的に X Y 方向に走査される。

【0032】

X Y 走査中、カンチレバー 5 の変位がセンサ 41 により検出され、振幅検出回路 45 によりカンチレバー 5 の振幅が求められる。そして、フィードバック回路 47 が、コンピュータ 7 から供給される振幅目標値に基づき、検出された振幅値と振幅目標値の差分に応じたフィードバック信号を生成する。フィードバック信号が走査制御回路 17 に供給され、走査制御回路 17 は、フィードバック信号に従って、検出振幅値と振幅目標値が一致するようにアクチュエータ駆動回路 15 を制御する。このフィードバック制御により、カンチレバー 5 と試料の距離が一定に保たれる。

【0033】

このようにして、カンチレバー 5 と試料の距離を一定に保つ Z 走査を行いながら、X Y 走査が行われる。Z 走査のフィードバック信号は、フィードバック回路 47 からコンピュータ 7 にも供給される。フィードバック信号は、試料の Z 方向の高さに対応している。また、試料上の X Y 方向の位置は、コンピュータ 7 が発生して走査制御回路 17 に供給する X Y 走査の制御信号により特定される。コンピュータ 7 は、X Y 走査の制御データと、入力されるフィードバック信号とに基づいて、試料表面の画像を生成してモニタ 51 に表示する。3 次元画像が好適に生成され、表示される。

【0034】

以上に AFM1 の全体的な構成と動作を説明した。次に、本実施の形態に特徴的な、励振効率のドリフトの影響を防ぐ構成と方法について説明する。

【0035】

既に説明したように、AFM1 の問題点として、励振効率のドリフトが挙げられる。励振効率が一定であることを前提にしていると、励振効率のドリフトによって良好なイメージが得られなくなる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 3 6 】

そこで、本発明は、イメージング走査中における励振効率のドリフトを補償する新しい技術を提供する。

## 【 0 0 3 7 】

カンチレバーの振動では、下記の(1)～(4)の現象が見られる。

(1) カンチレバーの振動は、探針が試料に接触していない場合には、励振の周波数  $F_c$  と同じ周波数成分のみをもつ。

(2) 探針が試料に接触すると、 $F_c$  の整数倍の周波数成分が現れる。

(3) 各成分の振幅の大きさは、下記の関係を有する。

2倍波 > 3倍波 > 4倍波 > . . . . .

10

(4) 2倍波(2次高調波)の振動振幅は、探針と試料の間の接触に敏感である。

## 【 0 0 3 8 】

図2は、カンチレバー振動のパワースペクトルであり、上記の現象を表している。図2のデータは、カンチレバーが振動し、カンチレバーの探針が基板に接触し、レバー振幅が自由振動振幅の90%であるときのデータである。図示のように、励振周波数の整数倍の周波数成分が現れている。振幅の大きさの関係は、2倍波 > 3倍波 > 4倍波である。

## 【 0 0 3 9 】

上述のように、2倍波成分は、探針と試料の間の接触に敏感である。したがって、2倍波成分の振幅が一定であれば、探針と試料の接触強さが維持され、探針部分での実際の振幅が維持される。励振効率が増加したとしても、探針部分の実際の接触強さと振幅を維持できれば、AFMを安定して使用し続けることができる。

20

## 【 0 0 4 0 】

そこで、AFM1は、上記の原理に基づき、2倍波成分の振幅に基づいて励振源である piezo素子の励振強度を制御する。AFM1は、カンチレバー5の振動信号から2倍波成分だけを取り出し、2倍波成分の振幅を計測し、その振幅が一定になるように励振源の強度を調節する。本実施の形態ではI制御が行われる。そして、励振源の強度は時定数の大きな積分回路を使って自動調節される。このようにして、励振源側の強度を調節することにより、カンチレバー側の実際の接触強度と振幅を維持できる。

## 【 0 0 4 1 】

図1に示すように、AFM1は、2倍波成分振幅検出回路31と、励振強度調節回路33とを備えている。

30

## 【 0 0 4 2 】

2倍波成分振幅検出回路31には、センサ41から、カンチレバー5の変位信号が入力される。この変位信号は、カンチレバー5の振動を表す。2倍波振幅検出回路31は、センサ信号から、励振周波数の2倍波成分の振幅を検出し、励振強度調節回路33に出力する。2倍波振幅検出回路31は、コンピュータ7により制御されてよい。2倍波検出回路31は、発振器27から供給される励振周波数の情報を用いてよい。

## 【 0 0 4 3 】

励振強度調節回路33は、2倍波振幅検出回路31により検出された2倍波成分の振幅に基づいて励振強度を調節する。より詳細には、2倍波成分の振幅が一定になるように励振強度がフィードバック制御される。励振強度調節回路33は、コンピュータ7から2倍波振幅目標値(2倍波成分の振幅目標値)を受け取り、検出された2倍波成分振幅と2倍波振幅目標値の差分に応じた調節信号(フィードバック信号)を発振器27に供給する。2倍波振幅目標値は、走査開始時の2倍波成分振幅に好適に設定される。2倍波振幅目標値は、実験または計算等によって設定されてよい。実際にAFM1を動作させてイメージングが行われ、イメージングが良好に行われるように2倍波振幅目標値が調整されてよい。2倍波振幅目標値は、適当な回路構成などを用いて手動で設定されてもよい。

40

## 【 0 0 4 4 】

発振器27は、加算器を内蔵している。発振器27は、励振強度調節回路33から供給される調節信号を、コンピュータ7から供給された励振強度指令値(振幅指令値)に加算

50

する。そして、発振器 27 は、加算後の信号に従って励振信号を生成する。この励振信号に従ってカンチレバー 5 が励振され、これにより 2 倍波成分振幅が目標値に一致するように制御される。

【0045】

A F M 1 で使われている発振器 27 についてさらに説明する。発振器 27 は、ゲイン調整用の加算器を持っており、指令値の D C 信号に外部信号を加算することにより正弦波の振幅を増減するように構成されている。指令値の D C 信号として、コンピュータ 7 からの励振強度の指令値が入力される。また、外部信号として、低速制御回路 (図 3 の符号 65、図 1 の符号 33) から調節信号が入力される。外部信号が加算されると、加算後の信号に比例して出力信号が変化する。

10

【0046】

図 3 は、上記の構成をより具体的に示している。図 3 において、A F M 1 は、ロックインアンプ 61、差分増幅器 63、低速制御回路 65 (SLOW CONTROLLER)、加算器 67 および発振回路 69 を備えている。

【0047】

ロックインアンプ 61 は、図 1 の 2 倍波振幅検出回路 31 に対応する。ロックインアンプ 61 は、非常に狭い帯域を持つバンドパスフィルタの機能を有する。ロックインアンプ 61 にはセンサ 41 からセンサ変位信号が入力される。また、ロックインアンプ 61 には、発振回路 69 の出力信号 (励振信号) が、励振周波数を特定する参照信号として入力される。ロックインアンプ 61 は、センサ変位信号から励振周波数の 2 倍の周波数成分を抽出し、2 倍波成分の振幅の信号を生成して差分増幅器 63 に出力する。図 3 では省略されている詳細な回路構成を説明すると、ロックインアンプ 61 は 2 倍波成分を検出しており、ロックインアンプ 61 の出力が小さい。そこで、ロックインアンプ 61 と差分増幅器 63 の間に増幅器が好適に設けられる。

20

【0048】

差分増幅器 63 および低速制御回路 65 は、図 1 の励振強度調節回路 33 に対応する。差分増幅器 63 は、検出された 2 倍波成分振幅と 2 倍波振幅目標値との差分に応じた信号を出力する。低速制御回路 65 は、時定数の大きな積分回路である。低速制御回路 65 は、励振強度の調節の速さを、A F M 1 の 1 画像取得時間以上といった長い時間に相当する速さへと遅くする役割をもつ。調節の速さは、例えば、1 画像取得時間の 1 ~ 10 倍程度に好適に設定される。要するに、1 ~ 10 枚程度 (数枚程度) の画像が取得される時間に相当する時定数を持つように、積分回路が構成される。これにより、試料の凹凸によるカンチレバー振動振幅の変化の影響を受けるのを防ぐことができる。

30

【0049】

加算器 67 と発振回路 69 は、図 1 の発振器 27 に対応する。上述したように、発振器 27 が加算器 67 の機能を内蔵している。低速制御回路 65 の出力信号は、加算器 67 に入力される。加算器 67 には、さらに、コンピュータ 7 から、励振強度指令値の D C 信号が入力される。加算器 67 は、励振強度指令値に、低速制御回路 65 から供給される調節信号を加算する。加算後の信号が発振回路 69 に供給され、励振用 piezo 素子 23 の励振に使用される。これにより、励振強度が、2 倍波成分振幅の検出値と目標値の差分に応じて調節され、2 倍波成分振幅の検出値が目標値に一致するように制御される。

40

【0050】

図 4 は、本実施の形態による励振強度調節の効果を示している。図 4 は、時間の経過に伴う 2 倍波成分振幅と調節信号の変化を示している。計測対象は、マイカ基板に吸着させたアクチンフィラメントとミオシン V の複合体である。計測時間は 180 秒 (3 分) である。2 倍波成分振幅は、図 3 のロックインアンプ 61 の出力であり、2 倍波成分の振幅検出値である。調節信号は、図 3 の低速制御回路 65 の出力である。また、図中の画像は、計測時間中の各時点で得られた画像である。

【0051】

図 4 において、調節信号は時間経過と共に増加しているが、2 倍波成分振幅は一定に保

50

たれている。調節信号の増加は、2倍波成分振幅の維持のために励振強度を増大する必要があったことを意味している。このことは、励振効率がドリフトしたこと、より詳細には、図の例では励振効率が低下したことを意味している。そして、励振効率がドリフトしたにも拘わらず、調節信号の供給によって2倍波成分が一定に保たれており、探針と試料基板との接触の強さの長時間平均が一定であることが分かる（長時間平均は、実際のイメージングよりも十分に長い時間における平均である）。

【0052】

そして、図4に示されるように、本実施の形態のAFM1によれば、計測時間中、安定なイメージングが行われている。2倍波成分振幅を一定に保つことによって自由振動振幅が維持されつつ、励振周波数成分（1次成分）の振幅に基づいてフィードバック走査が行われており、これにより、イメージングが好適に行われる。

10

【0053】

さらに、図4では、180秒が経過したときに、調節信号の供給を停止している。調節信号の供給が停止すると、励振強度が、コンピュータ7からの指令値に戻る。実際の励振効率は低下しているので、カンチレバー5の振幅が急に減少する。そのため、Z走査では、1次成分振幅が目標値より小さくなる。そして、カンチレバー5が試料から遠ざけられ、試料から離れてしまい、その結果、図示のようにイメージングが不可能になる。このことから、本実施の形態による励振強度の調節の効果が分かる。

【0054】

図4の例では、イメージングの速度が200 msec / frameである。本実施の形態のAFM1は、さらに高速のイメージングにも好適に用いられる。また、本実施の形態のAFM1は、生体分子のナノ機能動態を観察するために好適に利用されてよく、液中の生きたタンパク質の動きの観察に好適に利用されてよい。

20

【0055】

次に、本実施の形態の変形例を説明する。図3の構成では、2倍波成分を取り出すのに、ロックインアンプ61が用いられている。しかし、他の構成によって2倍波成分振幅が検出されてよい。例えば、AFM1は、ロックインアンプ61の代わりに、狭い帯域を持つバンドパスフィルタを備えてよい。カンチレバー5の変位信号がバンドパスフィルタに通されて、2倍波成分の振幅が検出されてよい。

【0056】

また、具体的構成の例では、発振器27が発算器67を内蔵していた。しかし、発算器67が発振器27に内蔵されていなくてもよい。また、同様の機能が、他の構成によって実現されてよい。例えば、同様の構成が、発振器の出力側に乗算器を設けることによって実現されてもよい。より詳細には、まず、調節信号が、低速制御回路65の出力側に配置された発算器により、適当な基準電圧（例えば1V）と加算される。これにより、調節信号が基準電圧付近で変動するように変換される。この信号が、発振器の出力側に配置された乗算器に入力され、発振器の出力と乗算される。これにより、図3の回路構成と同様に、励振強度が調節される。

30

【0057】

また、本実施の形態では、2倍波成分振幅の自動調節が、積分回路で実現されている。しかし、同様の機能が他の構成で得られてよい。例えば、デジタル回路で同様の機能が実現されてよい。

40

【0058】

また、本実施の形態では、カンチレバー5がピエゾ素子（圧電素子）によって励振された。しかし、本実施の形態の方法は、カンチレバーの励振法に依存しない。ピエゾ素子以外の構成によってカンチレバー5が励振されてよい。例えば、カンチレバー5は、光によって励振されてもよい。また、磁性化されたカンチレバーが交流磁場によって励振されてよい。

【0059】

光を使う場合、カンチレバー5に励振用のレーザー光が照射され、カンチレバー5が熱で

50

変形する。レーザ光強度が周期的に振動し、これによりカンチレバー 5 が振動する。カンチレバー 5 の振動の 2 倍波振幅成分が検出される。そして、2 倍波振幅成分が一定になるように、励振強度としてレーザ光強度が調節される。同様に、磁力を利用する場合も、2 倍波成分振幅が検出され、2 倍波成分が一定になるように励振強度が調節される。

【0060】

また、2 倍波振幅検出回路 31 は、整数倍振幅検出回路または整数倍振幅検出部の一例である。他の整数倍成分振幅、例えば 3 倍波成分の振幅が検出され、励振強度の調節制御に使用されてよい。利用される成分に応じて目標値も適当に設定される。ただし、2 倍波成分は、探針の接触強度に敏感であり、かつ、振幅が比較的大きい点で有利である。

【0061】

上述の実施の形態では、主として接触 AFM (Contact AFM) が想定され、本発明が接触 AFM に適用された。接触 AFM では、カンチレバーが試料に接触し、接触しているカンチレバーの整数倍波成分振幅が検出される。しかし、本発明は、非接触 AFM (Non-contact AFM) にも適用されてよい。非接触 AFM への適用例では、カンチレバーが試料に近接し、近接しているカンチレバーの整数倍波成分振幅が検出される。非接触 AFM は、探針と試料が接触しなくても探針と試料との間に微弱ながらも存在する相互作用力を利用する。この微弱な相互作用でもカンチレバーの振幅、位相 (励振信号とカンチレバー振動との位相差) が僅かに変化する。この相互作用力と整数倍波成分の関係が、接触 AFM における接触強さと整数倍波成分の関係と同様に利用される。これにより、本発明が非接触 AFM にも接触 AFM と同様に適用される。

【0062】

また、本実施の形態では、試料ステージの下面に試料が保持された。しかし、試料ステージの上面に試料が保持されてよい。そして、試料ステージの上にカンチレバーが配置されてよい。

【0063】

また、カンチレバーは窒化シリコン製でなくてもよい。例えば、カンチレバーはシリコン製でもよい。

【0064】

以上に本発明の好適な実施の形態について説明した。本発明によれば、カンチレバーの振動の整数倍成分振幅が検出されて、整数倍成分振幅に基づいて励振強度が調節される。整数倍成分振幅は、探針 - 試料間の接触の強さに敏感である。励振強度は、励振源の強度 (振幅) であり、励振源は例えば圧電素子である。励振効率が変化すると、励振源の励振強度および振幅に対するカンチレバーの実際の振動強度および振幅が変化する。本発明は、励振源の励振強度を調節して整数倍成分振幅を維持する。整数倍成分振幅が維持されれば、カンチレバーの実際の強度および振幅が維持される。つまり、整数倍成分振幅に基づき励振源サイドの振動強度が調節されるので、カンチレバーサイドの実際の振動強度と振幅が維持される。したがって、励振効率が変化しても安定して顕微鏡を使用できる。

【0065】

なお、上述したように、本発明は、接触 AFM (Contact AFM) にも非接触 AFM (Non-contact AFM) にも適用されてよい。非接触 AFM では、探針 - 試料間相互作用力と整数倍波成分の関係が、接触 AFM における接触強さと整数倍波成分の関係と同様に利用される。

【0066】

また、本発明では、整数倍成分振幅として、2 倍波成分振幅が検出されてよい。2 倍波成分振幅は、3 倍波、4 倍波等の他の整数倍成分振幅と比べて大きい。このように、2 倍波成分振幅は比較的大きく、容易に検出される。したがって、2 倍波成分振幅を用いることにより容易に励振強度を調節できる。

【0067】

また、本発明の走査型プローブ顕微鏡は、整数倍成分振幅が一定になるように励振強度を制御してよい。整数倍成分振幅を一定にすることにより、振動の強さを維持でき、長時

10

20

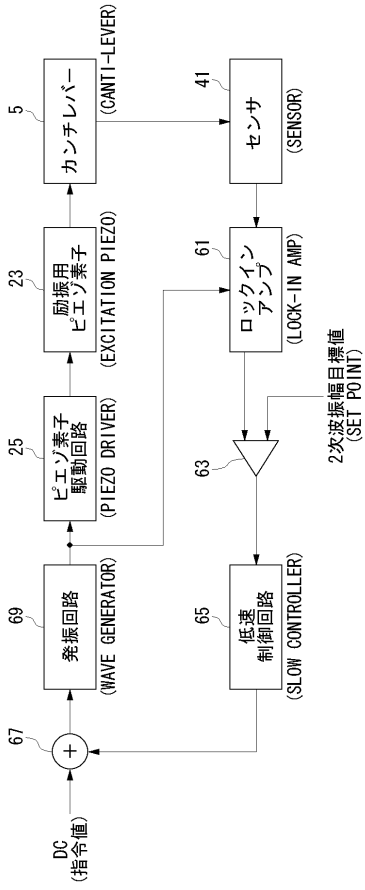
30

40

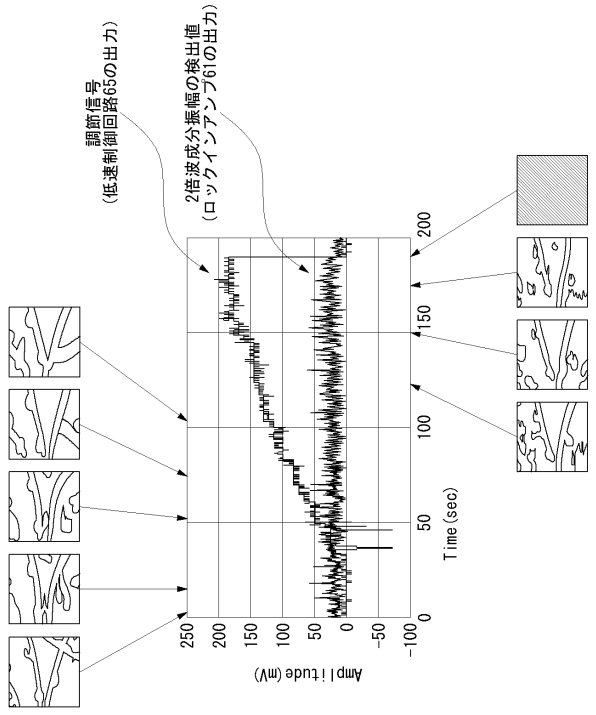
50



【 図 3 】



【 図 4 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 内橋 貴之  
石川県金沢市角間町又7番地 国立大学法人金沢大学内

審査官 渡 辺 純也

(56)参考文献 特開2002-162334(JP,A)  
特開2004-156959(JP,A)  
特公平6-103176(JP,B2)  
特表2003-532060(JP,A)  
特表2008-544270(JP,A)  
Jens Schiener et al, Stabilized atomic force microscopy imaging in liquids using second harmonic of cantilever motion for setpoint control, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 米国, American Institute of Physics, 2004年 7月26日, Vol. 75, No. 8, p2564 - p2568

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
G01Q 10/00 ~ 90/00  
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamII)